UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

CASE POSTALE 6128, SUCCURSALE A, MONTRÉAL, QUÉBEC, H3C 3J7

ÉLABORATION DES ROUTES ET HORAIRES DE VÉHICULES POUR LE TRANSPORT ADAPTÉ : L'ALGORITHME

par

Serge Roy, Jean-Marc Rousseau
Guy Lapalme et Jacques Ferland

Préparé pour le Centre de développement des transports
Transports Canada - TP 5596 F - Août 1984

Centre de recherche sur les transports - Publication #412F
Université de Montréal
Juin 1985

Dépôt légal - 3e trimestre 1985

Le contenu du présent rapport ne reflète que les opinions des auteurs et ne saurait en aucun cas engager les politiques et positions officielles du Centre de développement des transports, Transports Canada.

Also available in English as "Routing and Scheduling for the Transportation of the Disabled Persons : The Algorithm", #412A.

ÉQUIPE DE RECHERCHE ET COMITÉ DE DIRECTION

L'équipe de recherche du Centre de recherche sur les transports de l'Université de Montréal se composait de :

- Luc Chapleau, M.Sc.,
- Jacques Ferland, Ph.D.,
- Guy Lapalme, Ph.D.,
- Claude Mallette, B.Sc.
- Jean-Marc Rousseau, Ph.D.,
- Serge Roy, M.Sc.

Pour participer à l'évaluation des progrès des travaux et du rapport final, un comité de direction se composait de :

M. Frank H. Ahlin
Analyste senior en recherche opérationnelle
Toronto Transit Commission

M. François Beaulieu
Directeur adjoint Soutien technique et administratif
Service du Transport
Commission de transport de la Communauté urbaine de Montréal

M. B.E. Hicks
Gestionnaire principal de programmes
Association des Routes et Transports du Canada

M. John Ryell
Transit Office
Ontario Ministry of Transportation and Communications

M. Michel Trudel
Agent de recherche, Service des études
Ministère des transports du Québec

Mme Ling Suen
Conseillère spéciale principale
Centre de développement des Transports

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier pour leur collaboration la direction des transports des villes de Montréal, Sherbrooke et Toronto, ainsi que le Comité de direction du présent projet.

FORMULE DE DOCUMENTATION POUR RAPPORT

1. N° du rapport Transports Canada	2. N° de l'étude — CDT	3. N° de catalogue du destinataire
TP5596F	4712	

4. Titre et sous-titre	5. Date du rapport
Elaboration des routes et horaires de véhicules pour le transport adapté : l'algorithme	Août 1984
	6. N° du rapport de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)	8. N° de dossier Transports Canada
Serge Roy, Jean-Marc Rousseau, Guy Lapalme, et Jacques Ferland	D1450-103-51

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant	10. N° de dossier — ASC
Centre de recherche sur les transports Université de Montréal C.P. 6128 - Succursale "A" Montréal, Québec H3C 3J7	6 AG.T82-2-2511
	11. N° de contrat — ASC ou Transports Canada OAG82-00044

12. Nom et adresse de l'organisme parrain	13. Genre de rapport et période visée
Centre de développement des transports Transports Canada Bureau 2421, 1000 rue Sherbrooke Ouest Montréal, Québec H3A 2R3	Final
	14. Code de l'organisme parrain CDT 4712

15. Remarques additionnelles	16. Agent de projet — CDT
	S. Corbeil, L. Parent, T. Smith, C. Hirou

17. Résumé

Les principaux objectifs du projet étaient de développer un algorithme et des programmes informatiques pour confectionner des routes et des horaires de véhicules. Un objectif secondaire était la codification de problèmes tests pouvant servir à valider le logiciel développé et à d'autres études touchant le domaine du transport adapté. L'algorithme et les programmes informatiques furent améliorés successivement, à l'aide des tests effectués avec les données codifiées. Dans le système développé, un soin particulier est apporté à l'évaluation des distances entre les arrêts à visiter. Le dernier point nous a amenés à utiliser des AMF (Area Master Files), un ensemble de fichiers contenant diverses données géographiques. Dans l'algorithme de confection des routes et d'horaires, la qualité du service et la productivité des véhicules sont les critères considérés. Les résultats obtenus avec les tests effectués démontrent les avantages du système informatique comparativement à la méthode manuelle.

Le présent rapport décrit l'aspect technique d'un algorithme de confection de routes et d'horaires pour un système de transport semi-collectif pour personnes handicapées. L'objectif est de confectionner des routes et horaires qui maximisent le taux de productivité des véhicules en considérant une qualité de service fixée à chacune des demandes de transport. L'algorithme est en mesure de traiter des problèmes de grande taille.

18. Mots-clés	19. Diffusion
horaire, route, transport adapté	Nombre limité d'exemplaires disponibles au C.D.T.

20. Classification de sécurité (de ce rapport)	21. Classification de sécurité (de cette page)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non classifié	Non classifiée	21	nil

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP5596E	4712	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
Routing and Scheduling for the Transportation of the Disables Persons : The Algorithm	August 1984
	6. Performing Organization Report No.

7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
Serge Roy, Jean-Marc Rousseau, Guy Laplame, and Jacques Ferland	D1450-103-51

9. Performing Organization Name and Address	10. DSS File No.
Centre de recherche sur les transports Université de Montréal C.P. 6128 - Succursale "A" Montréal, Québec H3C 3J7	6 AG.T82-2-2511
	11. DSS or Transport Canada Contract No.
	OAG82-00044

12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Report and Period Covered
Transportation Development Centre Transport Canada Suite 2421, 1000 Sherbrooke Street West Montreal, Quebec H3A 2R3	Final
	14. Sponsoring Agency Code
	TDC 4712

15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer
	S. Corbeil, L. Parent, T. Smith, C. Hirou

17. Abstract

The main objective of the project were to develop an algorithm and computer programs for the construction of vehicle routes and schedules. A secondary objective was the coding of test problems which could be used to validate the software developed or which could be used in other studies concerning the transportation of the handicapped. The algorithm and computer programs were successively improved with the help of tests carried out on the coded data. In the system developed, special attention was devote to the evaluation of the distance between stops to be visited. This led us to the use of the Area Master Files, a set if files containing various items of geographical data. In the route and schedule construction algorithm, quality of service and vehicle productivity are the two criteria considered. Test results demonstrate the advantages of the computer system over manual methods.

This report describes the technical aspects of the route and schedule construction algorithm for a semi-collective transportation system for the handicapped. The objective is to maximize vehicle productivity for a fixed level of service for each request.

18. Key Words	19. Distribution Statement
routing, scheduling, transportation of the disabled	A limited number of copies are available from the sponsoring agency

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	21	Nil

SOMMAIRE

Ce document décrit l'aspect technique de l'algorithme de confection de routes et d'horaires pour un système de transport semi-collectif pour personnes handicapées. Ce logiciel fut développé et testé par le Centre de recherche sur les transports de l'Université de Montréal dans le cadre d'une subvention de l'Association des routes et transports du Canada (A.R.T.C.) et du Centre de développement des transports (C.D.T.) de Transports Canada. Un tel logiciel peut aussi servir d'outil pour évaluer des stratégies de fonctionnement.

Dans la littérature, nous retrouvons deux problèmes reliés à ce type de transport. Le premier consiste à confectionner des parcours pour un ensemble de demandes connues d'avance [2, 5]. Le second consiste à intégrer une nouvelle demande dans des parcours déjà existants [4]. Dans ce document, nous proposons une heuristique s'appliquant aux deux problèmes ; étant donné l'approche, le second devient un cas particulier du premier. Cette heuristique est en mesure de résoudre des problèmes de grande taille. Dans une première étape, l'objectif est de maximiser le taux de productivité des véhicules pour une qualité de service fixée à chacune des demandes. Dans l'étape suivante, nous maximiserons la qualité du service en conservant le taux de productivité atteint à l'étape précédente.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 1

2. L'INFORMATION. 2
   2.1 Les demandes. 2
   2.2 Les journées de chauffeurs avec véhicule. 2
   2.3 La table des distances. 3
      2.3.1 Les méthodes de localisation 3
      2.3.2 Les méthodes d'estimation. 3
      2.3.3 Les types de tables. 4
   2.4 La table des vitesse. 4
   2.5 Les temps de manutention. 5
   2.6 La qualité dui service. 6

3. DÉFINITINON 8
   3.1 Le concept de fenêtre horaire 8
   3.2 Le concept de voisins 10
   3.3 Une mesure d'insertion d'une demande dans un parcours . . 11
      3.3.1 L'agencement de deux demandes. 12
      3.3.2 Une mesure d'insertion d'une demande dans un parcours 14
   3.4 Le concept d'horizon. 15

4. L'HEURISTIQUE D'INSERTION. 17
   4.1 L'initialisation des parcours 17
   4.2 Comment déterminer les prochaines demandes à insérer. . . 17
   4.3 Comment déterminer le meilleur parcours pour une demande. 17
   4.4 L'insertion d'une demande dans un parcours. 17
   4.5 Les phases d'insertion. 18
   4.6 L'heuristique 19

5. LA POST-OPTIMISATION 20

6. RÉFÉRENCES 21

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Fonction vitesse 5
Figure 2 : Fenêtre horaire, départ souhaité 8
Figure 3 : Fenêtre horaire, arrivée souhaitée 9
Figure 4 : Demande voisine, cas 1 10
Figure 5 : Demande voisine, cas 2 11
Figure 6 : Une séquence de deux arrêts. 12
Figure 7 : L'affinité entre les demandes. 12
Figure 8 : L'agencement de deux demandes. 13

1. INTRODUCTION

Le nombre de personnes handicapées qui utilisent les transports en commun urbains va croissant. Cette situation conduit donc à la nécessité de relever l'efficacité et l'accessibilité de ces services. Il existe des systèmes pour l'exécution des tâches de gestion comme les réservations, la confection des horaires et la distribution des demandes. Toutefois, aucun programme informatique n'a encore été implanté pour la génération des parcours et des horaires pour une quantité importante de demandes.

Ce document décrit l'aspect technique de l'algorithme de confection de routes et d'horaires pour un système de transport semi-collectif pour personnes handicapées. Ce logiciel fut développé et testé par le Centre de recherche sur les transports de l'Université de Montréal dans le cadre d'une subvention de l'Association des routes et transports du Canada (A.R.T.C.) et du Centre de développement des transports (C.D.T.) de Transports Canada. Un tel logiciel peut aussi servir d'outil pour évaluer des stratégies de fonctionnement.

Ce type de transport exige des ressources humaines et financières importantes afin de préparer manuellement des parcours et horaires pour des dizaines de véhicules transportant des centaines d'usagers. A titre d'exemple, la Commission de transport de la Communauté urbaine de Montréal (C.T.C.U.M.) doit confectionner des parcours pour une cinquantaine de véhicules afin de desservir un territoire d'une superficie d'environ 300 kilomètres carrés.

Dans la littérature, nous retrouvons deux problèmes reliés à ce type de transport. Le premier consiste à confectionner des parcours pour un ensemble de demandes connues d'avance [2, 5]. Le second consiste à intégrer une nouvelle demande dans des parcours déjà existants [4]. Dans ce document, nous proposons une heuristique s'appliquant aux deux problèmes ; étant donné l'approche, le second devient un cas particulier du premier. Cette heuristique est en mesure de résoudre des problèmes de grande taille. Dans une première étape, l'objectif est de maximiser le taux de productivité des véhicules pour une qualité de service fixée à chacune des demandes. Dans l'étape suivante, nous maximiserons la qualité du service en conservant le taux de productivité atteint à l'étape précédente.

Nous distinguons deux techniques pour résoudre les problèmes de confection de routes pour plusieurs véhicules ; les heuristiques d'insertion et celles de "clustering". L'originalité de notre heuristique est d'utiliser en même temps ces deux techniques. Etant donné un niveau de service à respecter, nous déterminerons, pour chacun des arrêts, un intervalle de temps à l'intérieur duquel l'arrêt doit être visité. Une mesure d'insertion d'une demande dans un parcours est définie en fonction des fenêtres horaire et des distances entre les arrêts impliqués. Cette mesure est utilisée pour guider l'insertion en parallèle de groupes de demandes. Deux demandes sont dans un même groupe si elles possèdent un arrêt en commun à la fois dans le temps et dans l'espace.

2. L'INFORMATION

2.1 Les demandes

Une demande correspond à un déplacement d'une personne ou d'un groupe de personnes d'un lieu d'origine à un lieu de destination. Une heure de service est précisée, elle correspond à une heure de départ ou d'arrivée souhaitée, selon le type de la demande. Le groupe peut se composer de handicapés ambulants, de handicapés en chaise roulante et d'accompagnateurs.

Pour chacune des demandes (i) nous possédons comme information :

o(i) : L'indice du lieu d'origine de la demande (i).
d(i) : L'indice du lieu de la destination de la demande (i).
NBAM(i) : Le nombre de handicapés ambulants.
NBCH(i) : Le nombre de handicapés en chaise roulante.
NBCO(i) : Le nombre d'accompagnateurs.
PRIORITE(i) : Le niveau de la qualité de service à accorder.
TYPE(i) : Le type de la demande (i), (départ souhaité, arrivée souhaitée).
HS(i) : L'heure de service désirée, elle correspond à une heure d'arrivée ou de départ selon le type de la demande (i).

2.2 Les journées de chauffeurs avec véhicule

Un ensemble de journées de chauffeurs doit être fourni à l'heuristique. Ces journées peuvent être fournies par l'usager ou produites par l'algorithme de fabrication de journées de chauffeurs (voir J.-Y. Blais et J.- M. Rousseau [1]). L'utilisation de ce dernier exige l'estimation du nombre de véhicules nécessaires pour chaque période de la journée. Cette estimation peut être obtenue à partir du profil moyen de la demande. Il est important de noter que l'heuristique ne peut utiliser qu'un sous-ensemble de ces journées. A chacun des parcours produits par l'heuristique, correspond une pièce de travail d'un chauffeur pouvant le réaliser.

Une journée de chauffeur se compose d'une pièce de travail continue ou de plusieurs pièces de travail.

Pour chacune des journées (j), nous avons l'information suivante:

NBP (j) : Le nombre de pièces de travail formant la journée j.

Pour chacune des pièces k de la journée j :

o(k) : L'indice du lieu où débute la pièce de travail k.
d(k) : L'indice du lieu où se termine la pièce de travail k.
HD(k) : L'heure du début de la pièce de travail k.
HF(k) : L'heure de la fin de la pièce de travail k.

Ainsi que la capacité du véhicule affecté au chauffeur pour cette pièce de travail.

2.3 La table des distances

À chacune des demandes, correspondent deux arrêts, l'origine et la destination. À un ensemble de n demandes nous avons 2n arrêts, à ces arrêts correspondent m lieux ($m \leq 2n$). L'ensemble des arrêts attribués à un lieu dépend de la méthode de localisation.

2.3.1 Les méthodes de localisation

i. Tous les arrêts possédant une même adresse sont associés au même lieu.
ii. Les arrêts sont regroupés selon la distance qui les séparent, à chaque groupe correspond un lieu.
iii. Le territoire est divisé en secteurs, ces derniers peuvent être déterminés :
   - en utilisant les codes postaux,
   - avec une grille du territoire.
   - manuellement.

   À chacun des secteurs correspond un lieu, c'est le centroïde du secteur.

2.3.2 Les méthodes d'estimation

Nous définissons d(i,j), la distance entre le lieu (i) et le lieu (j). Cette distance peut être évaluée de plusieurs façons :

1) Soit $(x_i \ y_i)$ et $(x_j \ y_j)$ les coordonnées respectives des lieux i et j. La distance entre le lieu i et le lieu j peut être évaluée à l'aide d'une fonction des coordonnées.

   La fonction la plus simple (distance Manhattan)

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$$

   La distance euclidienne (la distance à vol d'oiseau)

$$d_{ij} = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2$$

Il existe plusieurs variantes de ces fonctions. Ces méthodes exigent que les lieux soient géocodés.

2) Le réseau routier est représenté par un graphe où un arc représente un segment de rue et un noeud représente une intersection. Chacun des lieux est associé à un noeud de notre graphe, ceci correspond à localiser le lieu sur une intersection de notre réseau routier.

   La distance entre ces noeuds est évaluée avec un algorithme de chemin le plus court.

Nous avons testé ces méthodes. La dernière fut retenue car elle procure des estimations plus précises en consommant moins de temps-machine. De plus, l'utilisation du réseau permet une localisation automatique des arrêts à visiter.

Cette comparaison des deux méthodes a permis d'apporter de nouvelles données sur un problème fortement discuté.

2.3.3 Les types de tables

Étant donné que l'heuristique exige souvent de connaître la distance entre deux points et que ce calcul est onéreux, nous optons pour l'utilisation d'une table des distances (les distances sont symétriques). Nous envisageons le choix entre deux types de tables.

Une table complète : Nous possédons la distance entre chacun des lieux.
Une table partielle : Pour un lieu donné, nous avons la distance avec les lieux voisins.

La méthode de localisation, la méthode d'estimation ainsi que le type de la table sont choisis en fonction du nombre de lieux et de la superficie du territoire. Pour m lieux, la dimension de la table complète est de $m(m+1)/2$.

d(i,j) : La distance entre le lieu (i) et le lieu (j),
d(i,i) : L'erreur due à la méthode de localisation. La distance moyenne entre deux points possédant le lieu i.

2.4 La table des vitesses

Le système permet à l'usager de définir la vitesse en fonction de la distance. Cette façon de procéder est beaucoup plus réaliste, compte tenu que, pour une petite distance, il y a toujours un temps fixe dû à l'accélération et à la décélération et que, pour les grandes distances, une vitesse supérieure est justifiée par la possibilité d'utiliser les voies plus rapides.

La fonction est précisée en donnant six valeurs :

VITMIN : La vitesse minimum. (mètres/minute)
VITMOY : La vitesse moyenne. (mètres/minute)
VITMAX : La vitesse maximum. (mètres/minutes)
d1 : La distance à partir de laquelle nous appliquons la vitesse moyenne. (mètres)
d2 : La distance à partir de laquelle nous appliquons la vitesse supérieure à la vitesse moyenne. (mètres)
d3 : La distance à partir de laquelle nous appliquons la vitesse maximum. (mètres)

Avec ces valeurs, nous appliquerons la fonction ci-dessous :

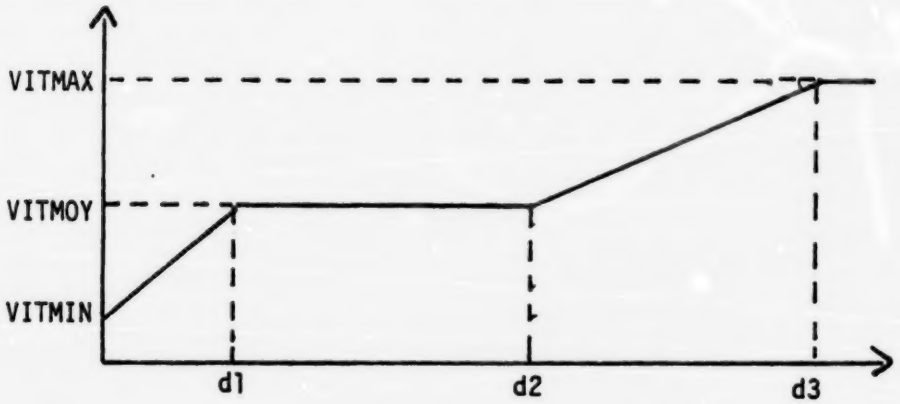

Figure 1 Fonction vitesse

Pour une distance d, notre fonction nous procure une vitesse v(d). Ceci nous permet de calculer un temps de déplacement t=d•v(d). Il est important qu'à un temps de déplacement corresponde une seule distance. Pour que nous puissions retrouver la distance à partir du temps, il faut avoir la condition suivante sur la fonction vitesse :

Il faut que toute droite partant de l'origine n'intersecte qu'en un seul point la fonction de vitesse. Cette contrainte nous assure qu'à un temps correspond une seule distance, ce qui nous permet de retrouver cette distance.

2.5 Les temps de manutention

À chacun des arrêts, un temps de manutention est calculé. Ce calcul est fonction du nombre et du type des handicapés de la demande qui correspond à l'arrêt. L'usager doit fournir les valeurs suivantes :

CHAISEMAN : Le temps de manutention pour une chaise roulante.
AMBUMAN : Le temps de manutention pour un ambulant.

Si la demande est composée de plusieurs personnes, alors, pour le premier, nous comptons son temps complet de manutention et, pour les autres, nous n'ajoutons que la moitié de leur temps de manutention. Cette façon de calculer prend en considération le fait que le véhicule est déjà arrêté, que le chauffeur est descendu et que les portes du véhicule sont ouvertes.

Si (i) est un arrêt de la demande "d", le temps de manutention pour l'arrêt (i) est donné par :

$$TM(i) = \begin{cases} (NBCH(d)+1)/2.0 * CHAISEMAN + NBAM(d)/2*AMBUMAN \\ \qquad\qquad \text{si } NBCH(d) > 0 \\ (NBAM(d)+1)/2.0 * AMBUMAN \quad \text{si } NBCH(d) = 0. \end{cases}$$

Nous permettons à l'usager de spécifier une valeur précise de temps de manutention pour l'origine et/ou la destination d'une demande pour tenir compte des cas particuliers. Si l'usager n'indique aucun temps, nous utilisons la fonction ci-dessus pour l'évaluer.

L'usager peut indiquer un délai donné au chauffeur pour le début et la fin de ces pièces de travail.

DEPGAR : Le temps donné au chauffeur pour le départ du garage.
ARRGAR : Le temps donné au chauffeur pour l'arrivée au garage.

2.6 La qualité du service

L'heuristique, en confectionnant les parcours, fixe pour chacune des demandes (i) :

HD(i) : L'heure à laquelle s'effectue le départ du véhicule de l'origine de la demande (i).
HA(i) : L'heure à laquelle s'effectue l'arrivée du véhicule à la destination de la demande (i).

Entre la prise et le dépôt des passagers d'une demande donnée, le véhicule peut être amené à desservir un ou plusieurs autres arrêts, ce qui implique un excès de route pour les passagers de la demande.

ERT(i) : Le surplus de temps à bord du véhicule pour la demande
ERT(i) = HA(i) - HD(i) - t(o(i),d(i)).

De plus, pour une demande (i), nous avons le type de la demande de TYPE (i) (départ ou arrivée souhaités) ainsi que l'heure de service désirée HS(i). Nous définissons :

DTD(i) : Déviation par rapport à l'heure de service désirée.

$$DTD(i) = \begin{cases} HD(i)-HS(i) & \text{si type (i) = Départ souhaité} \\ HS(i)-HA(i) & \text{si type (i) = Arrivée souhaitée} \end{cases}$$

Le transporteur spécifie des contraintes indiquant la qualité du service qu'il veut accorder à ses usagers. La qualité du service accordé à une demande est fonction de la priorité de la demande. Le transporteur est amené à fixer le niveau de service qu'il veut accorder en spécifiant pour chacune des priorités: la déviation maximale permise de l'heure de service désirée, l'excès de route maximal permis. (*) De plus, il peut spécifier le temps maximal qu'un passager peut demeurer dans le véhicule.

DM(j) : La déviation maximale permise par rapport à l'heure désirée pour la priorité j.
1) DTD(i) < DM(PRIORITE(i))

EM(j)* : L'excès de route maximal permis pour la priorité j.
2) ERT(i) < EM(PRIORITE(i))

VOYAGEMAX : Le temps maximum d'un voyage
3) HD(i)-HA(i) < VOYAGEMAX.

(*) L'excès de route peut être formulé de façon plus complexe comme étant un pourcentage de la durée directe de la demande. En spécifiant tout de même un minimum d'excès de route que tout passager peut être amené à faire.

3. DÉFINITION

3.1 Le concept de fenêtre horaire

À une demande correspondent deux arrêts, une origine et une destination. A chacun de ces arrêts, nous définissons une fenêtre horaire. La fenêtre horaire délimite l'intervalle de temps durant lequel l'arrêt doit être visité. Ces fenêtres horaires permettent de satisfaire la contrainte sur la déviation maximale permise de l'heure de service désirée et de limiter l'excès de route. Mais elle ne permet pas de respecter nécessairement la contrainte sur l'excès de route maximal permis. En travaillant avec les fenêtres horaires, nous relaxons la contrainte sur l'excès de route. Les fenêtres horaires d'une demande sont fonction de la qualité de service correspondant à la priorité de la demande.

Pour chacun des arrêts (k), nous définissons :

PLUSTOT(k) : L'heure le plus tôt à laquelle le véhicule peut arriver à l'arrêt (k).

PLUSTARD(k) : L'heure le plus tard à laquelle le véhicule peut arriver à l'arrêt k.

Représentons schématiquement la façon de déterminer les fenêtres horaire des arrêts d'une demande selon son type (départ ou arrivée souhaitée).

Considérons une demande (i), avec son origine o(i), sa destination d(i) et son type TYPE (i).

Si TYPE (i) = départ souhaité

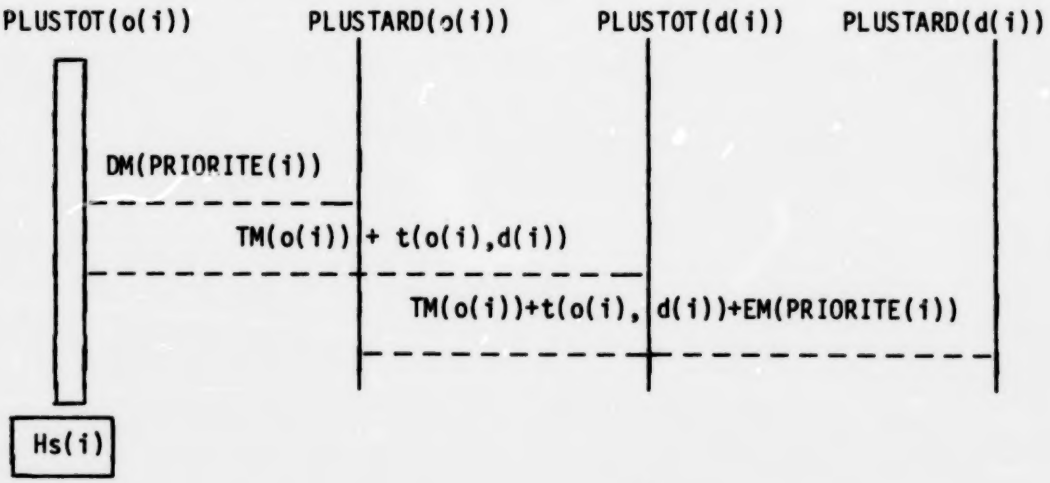

Figure 2 Fenêtre horaire, départ souhaité

Si TYPE (i) = arrivée souhaitée

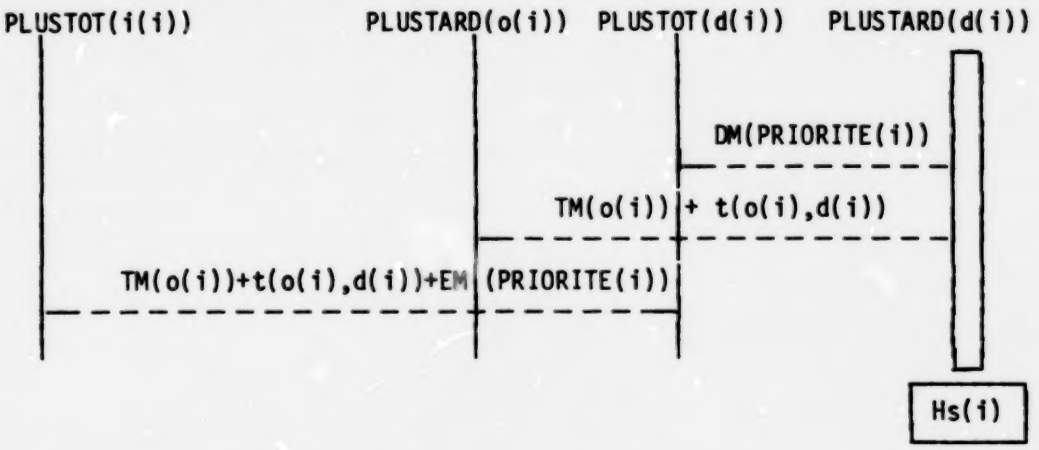

Figure 3 Fenêtre horaire, arrivée souhaitée

En définissant nos fenêtres horaires de cette façon, nous nous assurons de respecter la contrainte sur la déviation maximale de l'heure désirée. Les contraintes sur l'excès de route maximal et le temps de voyage maximal sont relaxées. Maintenant, nous avons comme contrainte au niveau de l'excès de route :

$$4)\ ERT(i) < \begin{cases} EM(PRIORITE(i)) + DM(PRIORITE(i)) - (HD(i) - HS(i)) \\ \qquad \text{si TYPE (i) = départ souhaité} \\ EM(PRIORITE(i)) + DM(PRIORITE(i)) - (HS(i) - HA(i)) \\ \qquad \text{si TYPE (i) = arrivée souhaitée} \end{cases}$$

$$5)\ HD(i)-HA(i) < \begin{cases} VOYAGEMAX + DM(PRIORITE(i)) - (HD(i) - HS(i)) \\ \qquad \text{Si TYPE (i) = départ souhaité} \\ VOYAGEMAX + DM(PRIORITE(i)) - (HS(i) - HA(i)) \\ \qquad \text{Si TYPE (i) = arrivée souhaitée} \end{cases}$$

Le temps permis pour dévier de l'heure de service désirée, non utilisé, est ajouté à la valeur du temps maximum d'un voyage.

Nous pourrions fausser les valeurs de EM(PRIORITE(i)) et/ou DM(PRIORITE(i)) de façon à respecter les contraintes spécifiées par le transporteur. Mais cette façon ne permet pas de satisfaire une demande en atteignant les bornes sur la déviation de l'heure désirée et sur l'excès de route, ce qui laisse peu de latitude à l'heuristique. Il est

préférable, dans une première étape, de relaxer les contraintes sur l'excès de route et sur le temps de voyage et puis de revenir dans la phase de post-optimisation en relocalisant les demandes qui ne respectent pas ces contraintes.

3.2 Le concept de voisins

Dans les approches proposées dans la littérature [2, 5], la technique employée afin de résoudre le problème à plusieurs véhicules est l'application de l'approche de groupes ("clustering"). Le problème à plusieurs véhicules est ramené à plusieurs problèmes à un véhicule en déterminant les demandes qui seront transportées par un même véhicule. La difficulté rencontrée avec cette approche est la formation des groupes, car il n'est pas évident de déterminer les demandes exécutées par un même véhicule. Il est tout de même assez facile de déterminer que quelques demandes seront exécutées par un même véhicule. Les demandes qui possèdent mutuellement un arrêt rapproché à la fois dans l'espace et dans le temps sont sujettes à être ramassées par un même véhicule. Ceci nous amène à définir le concept de mini"cluster" ou de groupe de demandes voisines.

Définissons la constante :

VOISINMAX : La distance maximale permise entre deux arrêts de deux demandes pour qu'elles puissent être considérées comme voisines.

Une condition nécessaire pour que deux demandes soient considérées comme voisines est que l'une possède un arrêt (ℓ) et l'autre un arrêt (k) tel que

(1) plustard(k)-plustot(ℓ) > t(ℓ,k) < VOISINMAX.

Si les arrêts (k) et (ℓ) sont de types différents, c'est-à-dire qu'un arrêt correspond à une origine et l'autre à une destination. Alors la condition nécessaire est suffisante. Illustrons un cas possible avec deux demandes.

d1 correspond à l'arrêt (ℓ) et o2 correspond à l'arrêt (k). Si la condition (1) est satisfaite, alors les deux demandes sont considérées voisines. La position des deux autres arrêts n'est pas considérée.

Figure 4 Demande voisine, cas 1

Si les arrêts (k) et (ℓ) sont de même type, c'est-à-dire deux origines ou deux destinations, alors, la condition (1) n'est pas suffisante; il est important de considérer la position des deux autres arrêts impliqués pour s'assurer que les demandes possèdent une même direction. Illustrons la condition supplémentaire exigée par un exemple.

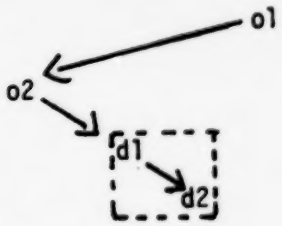

Figure 5 Demande voisine, cas 2

Supposons que d1 et d2 sastisfont la condition (1), il faut de plus que

(2) t(o1, o2) + t(o2,d1) soit inférieur à 1.4 t(o1,d1).

La constante 1.4 est un paramètre qui détermine approximativement une ellipse autour des arrêts, cette valeur provient de tests exécutés en transport scolaire.

3.3 Une mesure d'insertion d'une demande dans un parcours

Nous voulons définir une mesure d'insertion d'une demande dans un parcours pour nous guider dans notre insertion en parallèle. Cette mesure doit refléter l'affinité qui existe entre la demande et le parcours. La demande possède deux arrêts : l'origine et la destination. La relation de "précédence" entre l'origine et la destination doit être respectée. A chacun des arrêts de la demande correspond une fenêtre horaire et de même pour les arrêts formant le parcours. Ces dernières sont ajustées tenant compte de l'influence des autres arrêts du même parcours. Ces remarques suffisent pour constater que les distances séparant les arrêts de la demande avec les arrêts du parcours sont insuffisantes pour déterminer la mesure étant donné la dimension "temps" qui intervient au niveau des fenêtres horaires. Notre mesure doit consolider la dimension "espace" et la dimension "temps".

Premièrement, nous définirons une façon de vérifier si l'exécution de deux arrêts est réalisable. La même idée est utilisée pour vérifier la "réalisabilité" d'un agencement donné de deux demandes. Pour une demande et un parcours donnés, s'il existe un agencement réalisable entre notre demande et une autre demande déjà insérée dans le parcours, notre mesure nous indique le détour provoqué pour cet agencement. Dans le cas contraire, c'est-à-dire s'il n'existe aucune demande du parcours pouvant être agencée avec notre demande, la mesure nous indique par une valeur élevée que l'insertion de notre demande dans le parcours n'est pas réalisable.

Soit deux arrêts (i) et (j) et leur fenêtre horaire

[plustot(i),plustard(i)],[plustot(j),plustard(j)]

et t(i,j) le temps nécessaire pour aller de (i) à (j).

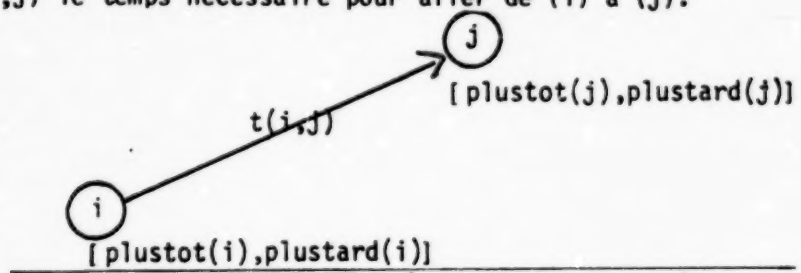

Figure 6 Une séquence de deux arrêts

Si l'on considère ces deux arrêts, la séquence (i) → (j) est réalisable si nous avons

$$PLUSTARD(j)-PLUSTOT(i)-t(i,j) > 0$$

3.3.1 L'agencement de deux demandes

Afin de visualiser le problème, considérons le schéma suivant. La demande en pointillé est notre demande de référence et nous considérons quatre autres demandes avec leurs fenêtres horaire.

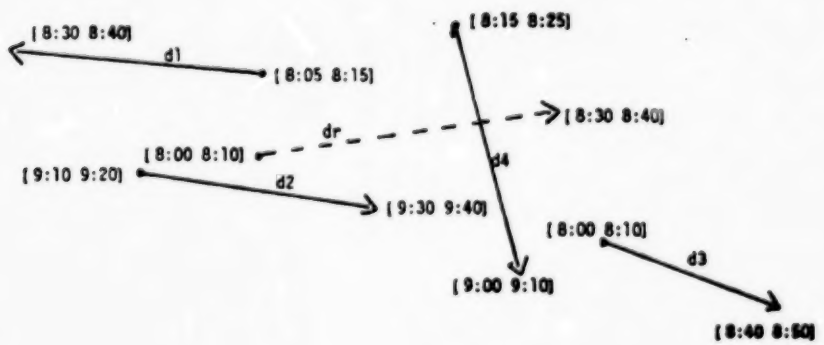

Figure 7 L'affinité entre les demandes

Parmi les demandes d1, d2, d3 et d4, quelle est celle qui a le plus d'affinité avec la demande de référence dr en pointillé? La demande d1 a une direction opposée. La demande d2 se présente trop tard et la demande d3 semble trop éloignée, si on examine l'agencement o(dr) → o(d4) → d(dr) → d(d4) des demandes dr et d4, c'est d4 qui semble avoir le plus d'affinité avec dr.

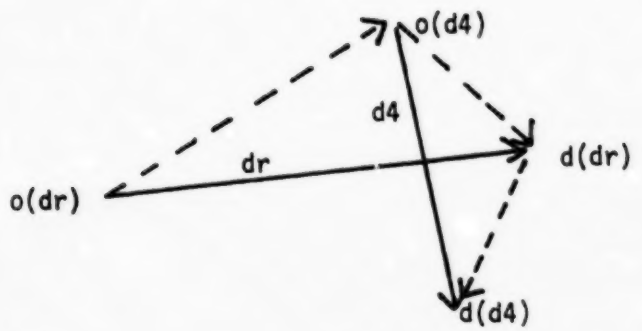

Figure 8 L'agencement de deux demandes

Nous constatons que l'affinité entre deux demandes dépend de l'agencement que nous considérons. Etant donné les relations de "précédence", il existe six façons d'agencer deux demandes. En considérant les demandes (k) et (ℓ), nous avons

1) $o(k) \rightarrow d(k) \rightarrow o(\ell) \rightarrow d(\ell)$
2) $o(\ell) \rightarrow d(\ell) \rightarrow o(k) \rightarrow d(k)$
3) $o(k) \rightarrow o(\ell) \rightarrow d(k) \rightarrow d(\ell)$
4) $o(k) \rightarrow o(\ell) \rightarrow d(\ell) \rightarrow d(k)$
5) $o(\ell) \rightarrow o(k) \rightarrow d(\ell) \rightarrow d(k)$
6) $o(\ell) \rightarrow o(k) \rightarrow d(k) \rightarrow d(\ell)$

En utilisant le même principe que mentionné pour vérifier la réalisabilité de l'exécution de deux arrêts, il est possible de définir des contraintes pour vérifier la réalisabilité d'un agencement donné de deux demandes.

L'agencement est une suite de trois séquences de deux arrêts (exemple : a → b → c → d), chacune des séquences doit être réalisable pour que l'agencement le soit. L'agencement est réalisable s'il satisfait les trois contraintes suivantes :

1) La première contrainte s'assure de la réalisabilité de la séquence:

$a \rightarrow b$

$\text{Min}\{\text{PLUSTARD}(b), \text{Min}\{\text{PLUSTARD}(c), \text{PLUSTARD}(d) - t(c,d)\} - t(b,c)\}$

$-\text{PLUSTOT}(a) - t(a,b)$ supérieur à 0.

2) La deuxième s'assure de la réalisabilité de la séquence :

$b \rightarrow c$

$\text{Min}\{\text{PLUSTARD}(c), \text{PLUSTARD}(d) - t(c,d)\} - \text{Max}\{\text{PLUSTOT}(b), \text{PLUSTOT}(a) + t(a,b)\}$

$-t(b,c)$ supérieur à 0.

3) La troisième contrainte s'assure de la réalisabilité de la séquence:

$c \rightarrow d$

$PLUSTARD(d)-Max\{PLUSTOT(c),Max\{PLUSTOT(b),PLUSTOT(a)+t(a,b)\}+t(b,c)\}$

$-t(c,d)$ supérieur à 0.

Pour les agencements 4 et 6, étant donné que la séquence $b \rightarrow c$ est logiquement réalisable dans le temps, la contrainte (2) n'a pas à être vérifiée et les contraintes (1) et (3) se simplifient pour donner :

1) $Min\{PLUSTARD(b),PLUSTARD(d)-t(c,d)-t(b,c)\}-PLUSTOT(a)-t(a,b)$

supérieur à 0

3) $PLUSTARD(d)-Max\{PLUSTOT(c),PLUSTOT(a)+t(a,b)+t(b,c)\}-t(c,d)$

supérieur à 0.

Pour les agencements (1) et (2), étant donné que les séquences $a \rightarrow b$ et $c \rightarrow d$ sont automatiquement réalisables, les contraintes (1) et (3) n'ont pas à être vérifiées et la contrainte (2) se simplifie pour donner :

2) $plustard(c)-plustot(b)-t(b,c)$ supérieur à 0.

Pour les séquences 3 et 5, les contraintes sont considérées sous leur forme générale.

3.3.2 Une mesure d'insertion d'une demande dans un parcours

Considérons une demande (d) et un parcours (p). Nous déterminons, à l'aide des contraintes de la section 3.3.1, les demandes réalisables entre la demande (d) et les demandes du parcours (p). Pour chacun de ces agencements réalisables, nous estimons le détour pour le parcours ; l'estimation dépend de l'agencement considéré.

Pour les agencements 1 et 2, étant donné le déplacement $t(b,c)$ possiblement à vide du véhicule, nous utilisons comme estimation du détour :

$$1.5 \bullet t(b,c) + t(c,d)$$

afin de pénaliser les déplacements à vide pour ne pas favoriser les déplacements trop longs qui seraient improductifs.

Pour les agencements 3, 4, 5 et 6, nous utilisons comme estimateur:

$$t(a,b)+t(c,d).$$

Pour ces agencements, $t(a,b)$ correspond au temps pour aller d'une origine à l'autre et $t(c,d)$ au temps pour aller d'une destination à l'autre.

Nous définissons la matrice :

INSERT(d,p) : la mesure d'insertion de la demande (d) dans le parcours (p).

INSERT(d,p) = { détour minimum pour les agencements réalisables de la demande (d) et les demandes du parcours (p)
- s'il existe au moins un agencement réalisable.

MAXMESURE
- s'il n'existe aucun agencement réalisable.

Donc, INSERT(d,p) nous indique soit que l'insertion de la demande (d) dans le parcours (p) n'est pas réalisable ou que l'insertion est possiblement réalisable et, dans ce dernier cas, elle nous indique une estimation du détour pour l'insertion de la demande dans le parcours. Avec cette mesure, il est possible de passer à une estimation du coût de l'insertion en considérant le détour.

Il est important de noter que la valeur INSERT(d,p) peut être modifiée si nous insérons une nouvelle demande (j) dans le parcours (p), car cette insertion peut modifier les fenêtre horaires des arrêts du parcours (p). Après chaque insertion d'une demande dans un parcours, les fenêtres horaires des arrêts sont ajustées. Si pour un arrêt k d'un parcours nous avons la fenêtre horaire [PLUSTOT(k),PLUSTARD(k)], après avoir inséré une nouvelle demande dans ce parcours, nous obtenons la fenêtre horaire [PLUSTOT*(k),PLUSTARD*(k)]. PLUSTOT*(k) sera l'heure le plus tôt à laquelle il sera possible d'arriver à l'arrêt (k), compte tenu des fenêtres horaires des arrêts qui précèdent (k). PLUSTARD*(k) est l'heure le plus tard à laquelle nous pouvons arriver à l'arrêt (k) pour être en mesure de respecter les fenêtres horaires des arrêts suivant l'arrêt (k). Après l'insertion d'une nouvelle demande dans le parcours, nous obtenons:

$$PLUSTOT^*(k) \geq PLUSTOT(k)$$

$$PLUSTARD^*(k) \leq PLUSTARD(k).$$

3.4 Le concept d'horizon

Dans le système TAXI - "A REALISTIC ADVANCE RESERVATION DIAL-A-RIDE ALGORITHM" [6], les demandes connues d'avance avec lesquelles il faut confectionner des parcours sont triées selon la difficulté potentielle d'insertion. Par la suite, elles sont insérées une à la fois dans l'ordre du tri. L'ordre d'insertion des demandes est indépendant des parcours en construction. Avec notre approche nous possédons une mesure qui reflète la difficulté d'insérer une demande dans un parcours tout en

tenant compte de la situation des parcours. Nous utilisons cette mesure pour déterminer l'ordre d'insertion des demandes. Comme une demande de l'après-midi n'influence pas l'insertion d'une demande du matin, il est inutile de considérer en même temps toutes les demandes de la journée. Nous allons considérer en même temps seulement les demandes ayant l'heure de service souhaitée dans l'horizon que nous considérons. L'horizon est déterminé par deux valeurs :

INFHORIZON : L'heure du début de l'horizon correspond à l'heure de service souhaitée la plustôt des heures de service souhaitées des demandes non insérées.

SUPHORIZON : L'heure de la fin de l'horizon correspond à l'heure de service souhaitée de la prochaine demande à entrer dans l'horizon.

La gestion de l'horizon se fait à partir des valeurs :

DEMHORIZON : Le nombre de demandes présentement dans l'horizon.

HORIZONMIN : L'intervalle de temps minimum que doit avoir l'horizon.

MAXDEMHOR : Le nombre maximum de demandes que peut contenir l'horizon.

L'horizon avance dans le temps en ajoutant la prochaine demande si nous avons :

(SUPHORIZON-INFHORIZON)<HORIZONMIN et DEMHORIZON<MAXDEMHOR

De cette façon, l'horizon avance graduellement dans le temps.

Pour toutes les demandes de l'horizon, nous possédons les mesures d'insertion des demandes dans les parcours. Ces mesures vont déterminer l'ordre d'insertion des demandes. Cet ajustement continuel de l'horizon assure que nous ne laissons pas une demande derrière sans l'insérer.

4. L'HEURISTIQUE D'INSERTION

L'heuristique est basée sur une technique d'insertion en parallèle. Tous les parcours sont confectionnés en même temps. Après l'initialisation de quelques parcours, il reste des demandes qu'il s'agit d'insérer dans ces parcours. Au besoin, nous pourrons initialiser de nouveaux parcours. Nous formons des groupes avec les demandes non insérées en utilisant les liens de voisinage qui existent entre les demandes, ces groupes sont utilisés pour initialiser au départ quelques parcours et pour déterminer les prochaines demandes à insérer.

Avant de présenter l'heuristique, nous détaillons les points suivants :

4.1) Comment initialiser au départ quelques parcours.
4.2) Comment déterminer les prochaines demandes à insérer.
4.3) Comment déterminer le meilleur parcours pour une demande.
4.4) Où insérer l'origine et la destination d'une demande dans un parcours.

4.1 L'"initialisation" des parcours

Avec chacun des groupes possédant suffisamment de demandes, nous "initialisons" un parcours et tentons d'insérer toutes les demandes du groupe. L'initialisation se fait en trouvant une pièce de travail non utilisée pouvant réaliser la demande la plus tôt du groupe. La pièce de travail choisie est celle avec le moins de perte de temps entre l'heure du départ de la pièce et l'heure à laquelle le véhicule doit exécuter la prise de la demande la plus tôt du groupe en suivant l'ordre de priorité suivant :

1) Aux pièces de travail de journée déjà initialisées (les journées avec une pièce de travail déjà initialisée).
2) Aux premières pièces de journée non initialisées.
3) Aux autres pièces.

4.2 Comment déterminer les prochaines demandes à insérer

Nous déterminons la demande de l'horizon possédant le plus de demandes voisines non insérées. Si cette demande (centroïde) possède un nombre suffisant de voisines, c'est cette dernière et ses voisines que nous allons essayer d'insérer dans un parcours. Si le groupe formé par ces demandes est petit, nous choisissons, comme prochaine demande à insérer, la demande de l'horizon qui possède la meilleure mesure d'insertion dans les parcours.

4.3 Comment déterminer le meilleur parcours pour une demande

La matrice INSERT(d,p) nous indique une estimation du détour provoqué par l'insertion de la demande dans le parcours p si l'insertion est réalisable. Ainsi, le meilleur parcours pour d est le parcours p*, tel que:

$$INSERT(d,p^*) = \min_{p} \{INSERT(d,p)\}$$

4.4 L'insertion d'une demande dans un parcours

Nous voulons insérer une demande dans un parcours. Une insertion est définie par un couple d'arrêts (GORI,GDES).

GORI : L'arrêt du parcours qui précède l'endroit où on veut insérer l'origine de notre demande.

GDES : L'arrêt du parcours qui précède l'endroit où on veut insérer la destination de notre demande. (Si GDES=GORI, c'est que nous insérons la destination immédiatement après l'origine de la demande.)

Une insertion réalisable est un couple (GORI,GDES) avec GORI < GDES pour lequel, si nous ajoutons les fenêtres horaires des arrêts du parcours après l'insertion, aucune ne se referme complètement. Nous avons toujours:

PLUSTOT*(k) < PLUSTARD*(k) pour les arrêts k du parcours.

À chacune des insertions réalisables, correspond un détour pour le parcours et des inconvénients pour la demande. Une insertion réalisable peut se faire selon différents critères:

1) Celle qui provoque le détour minimum
2) Celle dont la demande cause le minimum d'inconvénients.

4.5 Les phases d'insertion

Phase 1

Nous voulons insérer une demande "d". La phase 1 d'insertion consiste à trouver le meilleur parcours pouvant recevoir la demande "d". Les parcours sont évalués en ordre croissant de la mesure INSERT(d,p). Le meilleur parcours pour "d" est p* tel que

$$INSERT(d,p^*) = \text{Min } \{INSERT(d,p)\} \text{ pour tout } p$$

Phase 2

Nous voulons insérer des demandes dans le parcours (p). La phase 2 d'insertion consiste à trouver les meilleures demandes pouvant être insérées dans le parcours (p). Les meilleures demandes pour le parcours (p) sont les demandes non insérées qui sont des demandes voisines d'une demande du parcours (p) ou les demandes possédant une bonne mesure d'insertion dans le parcours (p), i.e. une petite valeur de INSERT(d,p).

4.6 L'heuristique

1) Trier les demandes par heure de service souhaitée.

2) Lire des demandes pour initialiser l'horizon et former les groupes de demandes voisines.

3) Initialiser un ou des parcours avec les groupes de demandes voisines.

4) TANTQUE (des demandes non insérées).

FAIRE DEBUT

4.1 SI (SUPHORIZON-INFHORIZON) est inférieur à HORIZONMIN

ALORS

DEBUT

- Augmenter l'horizon en lisant des demandes.
- Pour chacune des demandes lues, initialiser une ligne de la matrice "INSERT".
- Former et modifier les groupes de demandes voisines

FIN.

4.2 Déterminer la prochaine demande à insérer, d*.

4.3 Tenter une phase 1 avec la demande d*.

4.4 SI (d* pas insérée) ET (il reste des chauffeurs)

ALORS - Initialiser un parcours pour d*

4.5 Si la demande d* est insérée, faire une phase 2 avec le parcours qui a reçu la demande.

FIN.

5. LA POST-OPTIMISATION

Dans cette étape, nous minimiserons les inconvénients des clients (maximiserons la qualité du service) en conservant le taux de productivité atteint dans l'étape précédente. Pour une demande (i), l'inconvénient est évalué en fonction de la déviation de l'heure de service souhaitée DTD(i) et de l'excès de route ERT(i). L'usager, à l'aide de paramètres associés à la priorité de la demande, indique l'importance relative de chacun des facteurs DTS(i) et ERT(i).

Pour chacune des priorités de demande, l'usager spécifie :

PDTD(k) : Le poids à accorder à la déviation de l'heure de service souhaitée dans la fonction d'inconvénient pour une demande de PRIORITE (k).

PERT(k) : Le poids à accorder à l'excès de route dans la fonction d'inconvénient pour une demande de PRIORITE (k).

Avec ces valeurs, nous définissons :

INCONV(i) : L'inconvénient de la demande (i).

INCONV(i)=PDTD{PRIORITE(i)}*DTD(i)+PERT{PRIORITE(i)}*ERT(i).

À l'aide d'échange de demandes entre les parcours, nous tenterons de réduire l'inconvénient le plus élevé, le second, et ainsi de suite.

6. RÉFÉRENCES

1. Blais, J.-Y., Rousseau, J.-M., "HASTUS : An Evaluation Model for Drivers' Union Contract Negotiation in Transit Companies". Publication #163, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal. Mars 1980.

2. Bodin, L.D., Sexton, T.R., "The Multi-Vehicle Subscriber Dial-a-Ride Problem". Working paper MS/S 83-009. University of Maryland. Février 1983.

3. Chapleau, L., Ferland, J., Lapalme, G., Rousseau, J.-M., "A Parallel Insert Method for the Capacitated Arc Routing Problem". Publication #234, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal. Avril 1982.

4. Haines, G.H., Jr., Wolf, R.N., "Alternative Approaches to Demand Responsive Scheduling Algorithms". Transportation Research A 16A, 1, 43-54, 1982.

5. Jaw, J.J., Odoni, A.R., Psaraftis, H.N., Wilson, N.H.W., "A Heuristic Algorithm for the Multi-Vehicle many too many Advance-Request Dial-a- Ride Problem". Working paper MIT-UMTA-82-3, Massachusetts Institute of Technology. Juin 1982.

6. Krolak, P.D., "TAXI - A Realistic Advance Reservation Dial-a-Ride Algorithm". Internal TSC Working paper, Report No. DOT-TSC-UM262-PM-82-35. Octobre 1982.

7. Vaccaro, H., "Alternative Technique for Modeling Travel Distance". Masters Thesis in Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology. Juin 1974.

8. Rivard, G., "Construction des parcours des véhicules et des horaires des chauffeurs pour le transport des personnes handicapées". Publication #240, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal. Mai 1981.